This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

TRANSPORTATION
LIBRARY
TF
682
.V38

A 758,224 DUPL

ÉTUDE

DES

CHEMINS DE FER FUNICULAIRES

PAR

ALPHONSE VAUTIER
ingénieur.

EXTRAIT DU *Bulletin de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes.*

LAUSANNE
IMPRIMERIE GEORGES BRIDEL
1887

Transcriber
Library

ausport.
Einstein
8-23-49

LES
CHEMINS DE FER FUNICULAIRES

CHAPITRE PREMIER

Historique et classification.

Depuis plusieurs années les constructeurs de voies ferrées ont cherché les moyens de desservir un grand nombre de localités laissées de côté par le réseau des lignes à grand trafic. Il en est résulté la création de chemins de fer secondaires de divers systèmes.

La locomotive ordinaire à simple adhérence permet de circuler à petite vitesse sur des lignes dont la pente atteint 4 à 5 %. On l'employe même sur la ligne de l'Uetliberg près Zurich sur des pentes de 7 %.

En munissant la locomotive d'une roue motrice dentée agissant sur une crémaillère fixée à la voie, M. l'ingénieur N. Riggenbach a donné le moyen de franchir, à petite vitesse, des rampes atteignant 30 % et des tracés sinueux de grande longueur.

La traction par câble ou par chaîne, ou *système funiculaire*, permet de remorquer des vagons sur les rampes les plus fortes et de desservir ainsi, par le tracé le plus court, des localités à peine accessibles aux routes ordinaires. Nous nous proposons

de formuler les conditions qu'on doit rechercher dans un projet de chemin de fer funiculaire, puis nous examinerons quelques-uns des engins qui leur sont spéciaux.

Avant d'entrer en matière, jetons un coup d'œil rapide sur l'histoire de ce système de traction.

Selon toute probabilité, des câbles ou des chaînes ont été employés très anciennement dans les exploitations de mines ou de carrières et ont été appliqués au service des voies de bois qui ont préludé à l'invention des chemins de fer. La première mention que nous ayons trouvée de l'emploi de la traction funiculaire au transport de voyageurs et de marchandises, est celle d'un plan incliné à 2 $^0/_0$ de pente qui faisait partie de la première ligne de chemin de fer à locomotives ouverte entre Liverpool et Manchester en 1830.

Les locomotives de cette époque ne gravissaient guère que des pentes de 1 $^0/_0$, ce qui motivait l'emploi d'un câble et d'une machine fixe.

Dès lors, on établit un grand nombre de plans inclinés desservis par un câble ou par une chaîne, mais on se méfiait de leur sécurité. Perdonnet, après avoir parlé de ceux de Liège, de Styring-Vendel et de quelques autres qui existaient en 1860, remarque qu'il ne convient pas de dépasser une pente de 3 à 4 pour cent, lorsqu'on veut effectuer au moyen d'un câble un transport de voyageurs.

Grâce aux progrès considérables qui ont été faits dans la fabrication des câbles et à l'emploi de l'acier tréfilé, on est devenu plus hardi et la traction funiculaire est employée actuellement pour le service des voyageurs sur des pentes vertigineuses.

Sans chercher à dresser un catalogue des chemins exécutés jusqu'ici, nous citerons les suivants. Ils suffiront à montrer les progrès rapides que ce système a faits depuis quelques années.

Le chemin de fer funiculaire de Lyon à la Croix-Rousse a été inauguré en 1862, il présente une pente de 0^m16, et a une longueur de 489 m. Il transporte des voyageurs et est muni de freins automoteurs d'une grande énergie.

Dès 1873 on construisit à San-Francisco plusieurs chemins

à câbles sans fin, présentant des pentes de 0^m16 à 0^m19; ils ne transportent que des voyageurs.

Le funiculaire de Lausanne à Ouchy a été ouvert à l'exploitation en 1877. Il a 1500 m. de longueur et une pente maximale de 0^m12. Le Lausanne-Gare qui lui est juxtaposé à la même pente maximale et une longueur de 324 m. Ces deux chemins font le service des voyageurs et des marchandises.

Le chemin de fer du Giessbach, près du lac de Brienz, a été inauguré en 1880. Il a 346 m. de longueur et une pente maximale de 0^m32. Celui du Vésuve a 900 m. de longueur et une pente de 0^m63.

Le funiculaire de Territet à Glion, près de Montreux, a été inauguré en 1883. Sa longueur est de 674 m. et ses pentes varient de 0^m30 à 0^m57.

Celui de Marziele à Berne a commencé son service en 1885. On a achevé dernièrement celui de Bienne à Macolin et plusieurs autres sont en voie d'exécution.

Les derniers chemins cités ne transportent que des voyageurs.

Parmi les nombreux chemins à câbles destinés aux exploitations de mines et de carrières et qui ne transportent que des matériaux, nous citerons celui de Saillon en Valais, dont la pente est de 0^m80.

Classification.

La dénomination de chemin de fer funiculaire, adoptée aujourd'hui pour tous les chemins de fer où la traction s'opère par le moyen d'un câble ou d'une chaîne, comprend plusieurs variétés qui pourraient être classées de diverses manières. Nous remarquerons d'abord qu'elles forment deux groupes qui diffèrent beaucoup l'un de l'autre pour le mode d'action du câble et pour le tracé du profil en long.

Le PREMIER GROUPE se compose des funiculaires à câble sans fin.

Dans certains cas, le câble ou la chaîne est animé d'un mou-

vement continu et les vagons sont répartis sur toute sa longueur, ce qui forme une sorte de chapelet.

Le câble étant toujours tendu, soit par l'action des vagons, soit par celle d'un tenseur auxiliaire, le profil en long de ces chemins de fer peut présenter des pentes, des paliers et des contre-pentes.

La disposition en chapelet a en outre l'avantage de pouvoir fournir à un trafic considérable.

Voici deux exemples intéressants de l'emploi du câble sans fin.

1° *Les chemins de fer à chaine flottante* sont originaires du Lancashire et ont été appliqués récemment à l'exploitation des mines de Sommorostro et de Decido dans la province de Bilbao (Espagne).

La chaîne sans fin est tendue entre deux poulies assez élevées au-dessus de la voie pour que les vagons puissent circuler au-dessous de la chaîne. Chaque vagon porte une espèce de fourche dans laquelle les chainons s'engagent automatiquement. Les vagons sont répartis uniformément sur la longueur de la chaîne et comme les vagons descendants sont plus chargés que ceux montants, le système entier, composé de plusieurs chaînes sans fin successives, n'exige aucune force motrice pour opérer un transport considérable de minerais.

Ce système, très convenable pour des matériaux de peu de valeur, n'est pas suffisamment expérimenté pour qu'on puisse l'appliquer aux transports de voyageurs. Le mode d'attache et la résistance des chaînes n'inspirent pas une grande confiance. M. l'ingénieur Brüll a décrit ce système dans les mémoires des ingénieurs civils. (1883, II.)

2° *Les tramways de San-Francisco* sont actionnés par un câble sans fin à mouvement continu. Le câble est logé dans un canal en fer et ciment placé sous la voie et qui présente une rainure. La voiture (dummy) porte une pièce spéciale, nommée grip, qui pénètre dans le canal et serre le câble entre ses mâchoires. Le conducteur du dummy serre ou desserre le grip, ce qui lui permet d'arrêter à volonté le train pendant que le câble continue son mouvement.

Ce système est admirablement approprié aux rues à fortes pentes et à énorme circulation de San-Francisco. Il est très coûteux comme construction et comme exploitation.

L'établissement de ces funiculaires de rues soulève des difficultés nombreuses qui ont été très habilement résolues par leurs ingénieurs. Les Annales des ponts et chaussées de France de 1877 et 1880 renferment quelques détails sur ce sujet.

A Chicago, on a adopté un système analogue dans des rues à faibles pentes et à énorme circulation, afin d'obstruer le moins possible le passage.

Ce choix était motivé aussi par le fait que les locomotives patinent beaucoup sur les rails boueux des rues. Elles n'y trouvent guère que le quart de l'adhérence ordinaire.

Le SECOND GROUPE de chemins de fer funiculaires se compose de ceux dans lesquels le câble s'infléchit sur une poulie ou sur un tambour placé au haut du tracé et s'amarre par chacune de ses extrémité à un train.

Sa longueur est telle que lorsqu'un de ces trains est à l'extrémité supérieure de la voie, l'autre occupe l'extrémité inférieure, l'un descend tandis que l'autre monte. Le câble n'est tendu que par leur poids, de sorte que le profil en long ne peut présenter aucune contre-pente. Les paliers et les parties en faibles pentes doivent être assez courts pour être franchis par la puissance vive.

Ce système a reçu le nom de *plan incliné;* nous le lui conserverons, lors même qu'il n'est pas absolument exact. Il est généralement moins coûteux que le système à câble sans fin et présente plus de sécurité grâce à la fixité de l'amarrage du câble. Le mouvement des trains étant alternatif, le trafic est moins considérable qu'avec le chapelet de vagons, mais cet inconvénient est en partie compensé par une plus grande vitesse de marche.

Ce système convient donc bien aux chemins à faible trafic et à fortes pentes tels qu'on les rencontre souvent dans les contrées montagneuses.

Les chemins de Lyon, de Lausanne-Ouchy, du Giessbach,

de Territet-Glion et de Marziele sont les exemples les plus récents de ce système.

On pourrait former un troisième groupe pour les chemins funiculaires qui n'ont qu'un seul train. Le câble est amarré par une de ses extrémités à un tambour moteur. Le Lausanne-Gare offre deux exemples de ce système. L'étude du tracé d'un pareil chemin ne diffère en rien de celle du second groupe.

L'ingénieur Abt a proposé d'employer un câble pour remorquer sur de fortes pentes les trains ordinaires à locomotives. La seconde extrémité du câble est attachée à un vagon à contrepoids, qui coopère avec la locomotive pour effectuer la montée ou ralentir la descente. Ce système appartient aussi à notre second groupe.

Les funiculaires à câbles sans fin et les plans inclinés sont *automoteurs* lorsque les vagons descendants sont toujours plus chargés que ceux qui montent et que cet excédent de poids est suffisant pour vaincre la résistance des trains et du câble.

Ces circonstances ne se rencontrent guère que dans l'exploitation des carrières ou mines de montagne.

Lorsqu'il s'agit d'un service de voyageurs, les trains montants sont ordinairement plus chargés que ceux descendants et l'on devra avoir recours à un moteur ou à un contrepoids artificiel.

Parmi les nombreux chemins automoteurs, nous citerons ceux à chaîne flottante de la province de Bilbao et le chemin du Saillon (Valais).

Les funiculaires de Lyon sont actionnés par des moteurs à vapeur; il en est de même de ceux de San-Francisco et de Chicago.

Les chemins du Giessbach et de Territet-Glion sont à contrepoids d'eau.

Ce dernier système est évidemment celui qui exige les moindres frais de traction et il est préféré partout où l'on peut se procurer, sans trop de frais, de l'eau au sommet du plan incliné.

Au funiculaire de Bienne-Macolin on n'avait de l'eau qu'au

bas de la montagne, on a néanmoins trouvé avantageux de la faire monter à 450 m. de hauteur, au moyen d'une pompe à vapeur, pour alimenter le réservoir qui fournit l'eau aux caisses des vagons.

Lorsque les trains sont composés de plusieurs voitures et lorsqu'ils doivent admettre des vagons d'autres chemins de fer dépourvus de caisses à eau, le système à contrepoids d'eau n'est guère applicable. C'est le cas du Lausanne-Ouchy où l'on a utilisé une pression d'eau de 14 atmosphères, en actionnant le câble au moyen d'une turbine. On le voit, le système funiculaire présente une très grande variété de solutions et il ne saurait être question de formuler tous les problèmes que l'on rencontre dans leur étude.

Nous nous bornerons à l'examen de ceux qui se présentent habituellement dans l'élaboration des projets des chemins de fer à câble.

CHAPITRE II

Etude du profil en long.

DISTRIBUTION DES PENTES D'UN PLAN INCLINÉ

Nous avons déjà remarqué que les chemins de fer à *câbles sans fin* peuvent présenter des paliers et des contre-pentes. Leur profil en long sera donc étudié comme s'il s'agissait d'un chemin de fer ordinaire, en ayant soin toutefois de raccorder les pentes selon les formules que nous établirons dans le § 4 ci-après.

Lorsqu'il s'agit d'un *plan incliné*, le problème n'est plus aussi simple, car le profil en long ne doit présenter ni contre-pentes, ni paliers.

On doit chercher, en outre, à répartir les pentes de manière à diminuer autant que possible la dépense de force motrice et l'intensité de l'action des freins et il est nécessaire de se rendre compte d'avance de la puissance maximale du moteur et des freins.

Nous étudierons successivement à ce point de vue les plans inclinés à contrepoids d'eau, les plans inclinés automoteurs et ceux à moteur fixe.

§ 1. Plans inclinés à contrepoids d'eau.

Dans ce système les deux trains, composés ordinairement d'un seul vagon chacun, sont munis de grandes caisses qu'on remplit d'eau au haut du plan incliné et qu'on vide au bas.

Les trains se croisent au milieu de leur trajet et leurs positions successives sont toujours symétriques par rapport à ce point de croisement.

Nous appellerons *pentes symétriques* celles qui sont occupées en même temps, l'une par le train montant, l'autre par le train descendant et nous supposons que les deux voies ont identiquement le même profil en long, ce qui est le cas habituel.

Les plans inclinés à contrepoids d'eau que nous avons en vue ne présentent pas de stations intermédiaires. Rien n'empêcherait cependant d'en établir.

La vitesse des trains s'accélère au départ jusqu'au moment où elle atteint une valeur maximale qui se maintient jusqu'aux abords de la gare terminale et le trajet s'achève avec une vitesse décroissante. Nous ferons d'abord abstraction de cette variation de marche et nous supposerons que les trains sont animés d'une vitesse uniforme sur tout leur parcours ; puis dans un paragraphe suivant, nous examinerons les périodes de démarrage et de ralentissement.

Soit R S (fig. 1) Pl. 7 le profil en long d'un plan incliné, L la longueur de la voie entre ces deux points, et H leur différence de niveau.

Désignons pas $tg\ \gamma$ la pente au croisement, par $tg\ \alpha$ celle d'une partie quelconque de la voie en amont du croisement et par $tg\ \beta$ celle de la partie symétrique en aval.

Désignons par h la différence de niveau de ces deux points symétriques.

Soit p le poids par mètre courant de câble.

C la force nécessaire pour le maintenir en mouvement en supposant la voie de niveau. (Voir au § 6.)

P poids du train montant.

P′ poids du train descendant.

Q charge d'eau du train descendant.

f coefficient de résistance au roulement des trains sur une voie de niveau.

F, F′, F″ pressions exercées par les freins en sens inverse du mouvement des trains. (Voir au § 9.)

Considérons maintenant une position quelconque des trains. Le train descendant, que nous nommerons le *train moteur* est en a et le train montant en b. Le mouvement étant uniforme, il y a équilibre entre les forces qui produisent le mouvement et celles qui l'entravent. Nous pouvons donc écrire :

$$(P' + Q) \sin \alpha = P \sin \beta + ph + (P' + Q) f \cos \alpha + P f \cos \beta + C + F.$$

Le terme ph est le seul qui ne se comprenne pas à première vue, il est égal à la composante du poids de la partie $a\ C\ b$ du câble qui n'est pas équilibré par le train descendant.

Si nous considérons un mètre de longueur de câble faisant avec l'horizon un angle δ nous aurons, selon la fig. 2 :

La composante sq parallèle à la voie $= p \sin \delta$

Or le triangle mno donne $h' = \sin \delta$

On a donc $sq = ph'$ c'est-à-dire que la composante du poids du câble qui agit dans le sens du mouvement des trains est égale à son poids par mètre multiplié par la projection verticale de la longueur agissante. En additionnant toutes les composantes partielles on aura, quelle que soit la courbure affectée par le câble, $\Sigma\, sq = ph$.

Il peut paraître singulier que nous fassions intervenir le poids du câble comme force motrice, car il ne manifeste aucune tendance à descendre lorsqu'il repose sur une voie même très déclive. Cela provient du frottement considérable qu'il aurait à vaincre pour traîner sur le ballast et les traverses de la voie.

Il en est tout autrement lorsque le train le tend assez pour qu'il ne repose que sur des galets. Il est alors dans une position analogue à celle d'un véhicule sur roues.

La distance maximale des galets sera déterminée au § 7 ci-après.

Dans les applications on peut généralement remplacer $\cos \alpha$ et $\cos \beta$ par l'unité, dont ils diffèrent peu. Cette simplification est d'autant plus justifiée que le facteur f n'est pas déterminé d'une manière bien rigoureuse.

L'équation d'équilibre des forces qui agissent lorsque le train moteur est en amont du croisement sera donc :

$$(P' + Q) \sin \alpha - P \sin \beta - p h - (P + P' + Q) f - C = F \quad (1)$$

Lorsque le train moteur est arrivé au point b, symétrique de sa première position, on a de même :

$$(P' + Q) \sin \beta - P \sin \alpha + p h - (P + P' + Q) f - C = F' \quad (2)$$

Lorsque les trains se croisent on a :

$$(P' + Q) \sin \gamma - P \sin \gamma - (P + P' + Q) f - C = F'' \quad (3)$$

Ecrivons en outre l'équation du travail des forces qui agissent entre les points R et S.

$$(P' + Q) H - P H - (P + P' + Q) L f - C L = \Sigma F \quad (4)$$

Le symbole ΣF représente ici la somme des travaux des freins pendant toute la course SR.

Cette équation est indépendante des variations de vitesses qui peuvent se produire pendant le trajet, mais elle suppose que les vitesses au départ et à l'arrivée soient égales entre elles ou toutes deux nulles.

Les quatre équations fondamentales que nous venons d'établir renferment des quantités connues et invariables, ce sont H L et f. Les valeurs de p et de C peuvent être déterminées à priori avec une approximation suffisante.

Les poids des trains P et P' varient d'une course à l'autre, mais comme nous cherchons à déterminer le maximum du contrepoids d'eau, il convient de donner à P la valeur maxi-

male qu'il peut atteindre dans l'exploitation et à P′ la valeur minimale.

Les quantités inconnues sont :

Les pentes des divers points de la ligne, ainsi que Q, F, F′ F″ et ΣF.

Nous verrons plus loin que h dépend des autres éléments du problème, mais il n'est pas explicitement donné.

Pour déterminer ces inconnues, nous n'avons que les quatre relations algébriques ci-dessus, mais il faut en outre qu'elles réalisent la continuité de la ligne.

Il dépend de nous de choisir parmi les profils en long qui réalisent toutes ces conditions, celui qui convient le mieux au profil du terrain naturel et exige les moindres frais de construction.

Ce choix exige quelques tâtonnements, mais on abrègera beaucoup ce travail en s'inspirant des considérations suivantes.

A. *Etude du profil théorique.*

Nous allons rechercher en premier lieu quelle serait la forme la plus avantageuse à donner au profil en long au point de vue de l'économie d'eau, en admettant que les trains sont animés d'une vitesse uniforme entre les points S et R.

Il est évident que le travail des freins doit être nul sur toute la longueur du trajet.

Nous aurons donc F, F′, F″ et ΣF nuls.

L'équation (4) nous fournira la valeur du contrepoids d'eau.

$$Q = \frac{(P - P')\,H + (P + P')\,L f + C\,L}{H - f L} \qquad (5)$$

L'équation (3) détermine la pente au croisement

$$\sin \gamma = \frac{(P + P' + Q)\,f + C}{P' + Q - P} \qquad (6)$$

Cette valeur est entièrement connue et se retrouve dans nos calculs subséquents. Nous la désignerons par la lettre M.

Deux pentes symétriques quelconques seront données par les équations (1) et (2), car en faisant leur somme et leur différence on a

$$\sin \alpha - \sin \beta = \frac{2\,p\,\mathrm{H}}{\mathrm{P} + \mathrm{P}' + \mathrm{Q}} \qquad (7)$$

$$\sin \alpha + \sin \beta = \frac{2\,(\mathrm{P} + \mathrm{P}' + \mathrm{Q})\,f + 2\,\mathrm{C}}{\mathrm{P}' + \mathrm{Q} - \mathrm{P}} \qquad (8)$$

Pour simplifier nos notations nous écrirons

$$\frac{p}{\mathrm{P} + \mathrm{P}' + \mathrm{Q}} = \mathrm{N}$$

et nous remarquons que la valeur de $\sin \alpha + \sin \beta$ est égale à 2 M.

Nous aurons encore par addition et soustraction

$$\sin \alpha = \mathrm{N}\,h + \mathrm{M} \qquad \sin \beta = \mathrm{M} - \mathrm{N}\,h$$

La valeur de h n'étant connue que pour les points extrêmes de la ligne, le problème serait indéterminé si nous ne faisions une convention qui assure la continuité de la courbe selon laquelle seront placés les rails.

Soit R S (fig. 3) le profil en long cherché, divisons sa longueur L en un nombre pair de parties égales que nous numérotons à partir des deux extrémités de manière que les parties symétriques de la voie aient le même numéro et les mêmes indices.

Nous admettrons que les projections horizontales l' de ces divisions l de la ligne soient aussi égales entre elles, ce qui est peu éloigné de la vérité en raison de la très faible courbure de la ligne R C S.

Nous supposons connus les divers angles d'inclinaison $\beta\ \beta_1\ \beta_2 \ldots$ et leurs symétriques $\alpha\ \alpha_1\ \alpha_2 \ldots$ et nous traçons ces diverses pentes de manière que deux pentes successives se coupent au milieu de la distance entre deux ordonnées successives.

Dans ces conditions nous pourrons calculer les ordonnées des points 1, 2, 3, 4 et nous en déduirons l'équation générale de la courbe qui satisfait au présent problème.

Tableau des ordonnées.

Partie inférieure.

$$y_1 = \frac{l}{2}(\sin\beta + \sin\beta_1)$$

$$y_2 = \frac{l}{2}(\sin\beta + 2\sin\beta_1 + \sin\beta_2)$$

$$y_3 = \frac{l}{2}(\sin\beta + 2\sin\beta_1 + 2\sin\beta_2 + \sin\beta_3)$$

$$y_4 = \frac{l}{2}(\sin\beta + 2\sin\beta_1 + 2\sin\beta_2 + 2\sin\beta_3 + \sin\beta_4)$$

Partie supérieure.

$$Y_1 = H - \frac{l}{2}(\sin\alpha + \sin\alpha_1)$$

$$Y_2 = H - \frac{l}{2}(\sin\alpha + 2\sin\alpha_1 + \sin\alpha_2)$$

$$Y_3 = H - \frac{l}{2}(\sin\alpha + 2\sin\alpha_1 + 2\sin\alpha_2 + \sin\alpha_3)$$

$$Y_4 = H - \frac{l}{2}(\sin\alpha + 2\sin\alpha_1 + 2\sin\alpha_2 + 2\sin\alpha_3 + \sin\alpha_4)$$

Nous avons par définition $h = Y - y$ de sorte que pour le point 1 par exemple, on *a :*

$$h_1 = H - \frac{l}{2}(\sin\alpha + \sin\alpha_1 + \sin\beta + \sin\beta_1) = H - 2\,l\,M$$

On trouverait de la même manière

$$h_2 = H - 4\,l\,M$$
$$h_3 = H - 6\,l\,M$$
$$h_4 = H - 8\,l\,M$$

Nous pouvons maintenant calculer une ordonnée quelconque en fonction de quantités connues.

Pour la quatrième, par exemple, nous aurons à faire l'addition suivante des valeurs des sinus :

$$\begin{aligned} \sin\beta &= \mathrm{M} - \mathrm{NH} \\ 2\sin\beta_1 &= 2\mathrm{M} - 2\mathrm{NH} + 4l\mathrm{MN} \\ 2\sin\beta_2 &= 2\mathrm{M} - 2\mathrm{NH} + 8l\mathrm{MN} \\ 2\sin\beta_3 &= 2\mathrm{M} - 2\mathrm{NH} + 12l\mathrm{MN} \\ \sin\beta_4 &= \mathrm{M} - \mathrm{NH} + 8l\mathrm{MN} \end{aligned}$$

d'où

$$y_4 = \left\{ 2 \times 4(\mathrm{M} - \mathrm{NH}) + [2(2+4+6)+8]\, l\,\mathrm{MN} \right\} \frac{l}{2}$$

Nous discernons ici la loi à appliquer au calcul d'une ordonnée quelconque de *rang* m et nous observons que les termes 2, 4, 6, sont en progression arithmétique dont la raison est 2 et le premier terme 2 et qu'il y aura toujours $m - 1$ termes de cette progression dans la valeur de y_m.

On peut donc écrire :

$$y_m = \frac{l}{2} \left\{ 2m(\mathrm{M} - \mathrm{NH}) + [2(m^2 - m) + 2m]\, l\,\mathrm{MN} \right\}$$

ou $$y_m = lm\,(\mathrm{M} - \mathrm{NH}) + l^2 m^2\,\mathrm{MN}$$

Le facteur lm indique la longueur de voie qui sépare le point considéré de l'origine ; si donc nous nommons L′ la longueur de la projection horizontale de la ligne et L la longueur de la voie, on aura avec une exactitude suffisante $x = lm = \frac{\mathrm{L}'}{\mathrm{L}}$

L'équation générale de la courbe du profil en long théorique devient donc

$$y = \frac{\mathrm{L}}{\mathrm{L}'}(\mathrm{M} - \mathrm{NH})\,x + \mathrm{MN}\frac{\mathrm{L}^2}{\mathrm{L}'^2}\,x^2 \qquad (9)$$

C'est l'équation d'une parabole qu'il sera facile de construire par points.

Sa longueur totate est donc $\mathrm{L} = \mathrm{L}' + \frac{\mathrm{H}^2}{2\mathrm{L}'}$

Cette courbe s'écarte peu de la pente uniforme qu'on obtiendrait en traçant la ligne droite R S et cet écart dépend uniquement du poids du câble ; cependant on ne pourrait substituer cette pente uniforme à la courbe théorique sans grever l'exploitation d'une dépense d'eau assez notable, ainsi que nous le verrons dans l'exemple numérique ci-après.

Un chemin de fer funiculaire à contrepoids d'eau a une longueur de $1500^{m}45 = L$. Sa longueur en plan est de 1487 m. $= L'$. Ses extrémités ont une différence de niveau $H = 200$ m.

Le poids du train montant le plus chargé $P = 11\,000$ kg., celui du train descendant à vide $P' = 7000$ kg. Le poids p du câble $= 1^{kg}5$ par mètre et la force nécessaire pour le faire mouvoir est évaluée à $C = 90$ kg., ainsi que nous le verrons au § 6 ci-après.

Nous ferons $f = 3$ kg. par tonne.

L'équation (5) nous donne le poids d'eau nécessaire pour entretenir un mouvement uniforme

$$Q = 5200 \text{ kg.}$$

Le facteur M est donné par l'équation (6)

$$M = \frac{(P + P' + Q) f + C}{P' + Q - P} = 0{,}133$$

$$N = \frac{p}{P + P' + Q} = 0,\ 0000646$$

La pente maximale $\sin \alpha = 0{,}146$ et la pente minimale

$$\sin \beta = 0{,}120.$$

L'équation de la courbe sera :

$$y = 0{,}12106\ x + 0,\ 00000874\ x^2$$

Le point de croisement sera à 95 m. en dessus du plan de comparaison passant par le point R, tandis que la pente uniforme aurait une altitude de 100 m. en ce point de croisement.

Si nous donnions à la voie une pente uniforme le contrepoids d'eau devrait être calculé au moyen de l'équation (1) en faisant $\sin \alpha = \sin \beta = 0{,}133$ $h = 200$ et $F = 0$.

On trouve ainsi qu'il faudrait 7508 kg. d'eau au lieu de 5200 kg. qu'exige le profil théorique.

L'équation (2) dans laquelle on donnerait à Q la valeur de 7508 kg. montre que les freins devraient exercer une pression de 600 kg. contre les dents de la crémaillère.

Cet exemple suffit pour montrer que l'étude du profil en long a une importance réelle et qu'une légère modification de pente influe notablement sur la dépense d'eau et sur le volume du réservoir qu'on doit placer sous les vagons. Ce dernier élément n'est point indifférent, car la place disponible est restreinte par les essieux et les freins.

On remarquera aussi que les frais d'acquisition et d'entretien du câble, des freins et de la voie sont proportionnels à la charge des vagons multipliée par la pente maximale du tracé et que notre profil en long théorique donne à ce produit la plus faible valeur possible.

Pour arriver à une formule pratique nous avons admis l'égalité des longueurs partielles l', ce qui n'est pas rigoureusement exact. Il en résulte que lorsqu'on calcule y pour $x = L'$, on obtient une valeur un peu différente de H. Dans notre exemple on a $y = 199^{m}36$ au lieu de 200 m.

Pour calculer les cotes intermédiaires du profil en long on corrigera cette petite erreur en ajoutant au facteur de x^2 la valeur $\frac{H - y}{x^2}$. Ce facteur devient dans notre cas

$$\frac{0,64}{(1482)^2} + 0,00000874 = 0,00000903.$$

Démarrage et arrêt des trains.

Nous avons déterminé le profil et la charge d'eau qui assurent l'uniformité du mouvement des trains. Il nous reste à voir comment ceux-ci acquièrent la vitesse initiale.

Le premier moyen qui se présente à l'esprit consiste à ajouter au poids d'eau un surpoids q calculé de manière à donner aux trains une vitesse v après un trajet de longueur l''.

En conservant les notations précédentes et en nommant G le poids des galets en mouvement et de la poulie, le surpoids d'eau a pour valeur

$$q = \frac{(P + P' + Q + pL + G)\, v^2}{2\, g\, l''\, sin\, \alpha - v^2} \qquad (10)$$

ce qui exprime que le travail du surpoids q donne à l'ensemble des pièces en mouvement la puissance vive correspondant à la vitesse v.

En appliquant cette formule à l'exemple traité ci-dessus et en faisant $l'' = 100$ m., $v = 4$ m. et $G = 3000$ kg., on obtient $q = 1686$ kg.

Ainsi chaque course dépenserait 5200 + 1686 kg. d'eau, soit $6^{m3}9$.

Sous l'action de cette force supplémentaire les trains prendraient une vitesse accélérée qui devrait être rendue uniforme par l'action des freins.

Dans les applications, il conviendrait de majorer cette valeur de q afin de tenir compte du frottement au départ qui est un peu supérieur au frottement en marche.

On le voit, ce moyen de donner l'impulsion aux trains est onéreux et on devra lui préférer le système suivant :

Ce second moyen consiste à augmenter la pente du profil en long théorique, sur une certaine longueur aux abords de la station supérieure. Le train-moteur acquiert ainsi au moment de son départ une force de traction supérieure à celle que nous avons trouvée nécessaire pour équilibrer le train inférieur et vaincre les frottements de roulement.

Reportons-nous à la fig. 3 et désignons par $H + h'$ la hauteur de la station supérieure S'.

Les pentes sont tracées d'après l'équation (9) entre les points R et S, mais la partie supérieure a une pente plus forte sur une longueur l'' pour aboutir à la station S'.

Soit $tg\ \alpha'$ la pente entre T et S' et $tg\ \alpha$, celle qu'elle remplace entre T et S, nous avons

$$h' = l''\ (sin\ \alpha' - sin\ \alpha)$$

Le train-moteur descend entre S′ et T d'une hauteur h' plus grande que celle nécessaire pour équilibrer le train inférieur et vaincre les frottements, ce qui donne un travail moteur supplémentaire

$$(P' + Q + \frac{h'}{2} p) h'$$

La puissance vive acquise par les trains, le câble et les galets à la fin du parcours l'' est

$$\frac{P + P' + Q + Lp + G}{2g} v^2$$

En écrivant que ces deux quantités sont égales et en négligeant le terme $\frac{h'}{2} p$ qui est insignifiant auprès des autres forces, nous avons la relation :

$$h' = \frac{P + P' + Q + Lp + G}{2g\,(P' + Q)} v^2 \qquad (11)$$

La quantité Q est donnée par l'équation (5) en fonction de H et nous connaissons la hauteur totale $K = H + h'$ de la station supérieure au-dessus de l'inférieure ; c'est une donnée fondamentale du problème.

Nous avons donc les deux équations :

$$K - H = \frac{P + P' + Q + Lp + G}{2g\,(P' + Q)} v^2$$

$$Q = \frac{(P - P')\,H + (P + P')\,Lf + CL}{H - fL}$$

qui déterminent les quantités Q et H et par suite h'. Leur résolution est facile à faire numériquement ou même par simple tâtonnement en prenant pour première valeur de Q celle, un peu trop faible, qui correspondrait à $H = K$.

Les valeurs de Q, de H et de h' ainsi déterminées, et le profil en long étant construit entre R et T d'après l'équation (9) et se terminant par la pente T S′ on est assuré que le train-mo-

teur entraînera l'autre train avec une vitesse croissante de S′ en T et qu'il parcourra le reste de la ligne jusqu'à une distance l'' de R avec la vitesse uniforme v qu'on s'est fixée.

Le reste du parcours aura lieu avec une vitesse décroissante, car le train montant parcourt la pente T S′ et ce n'est que grâce à la puissance vive que la course peut s'achever.

L'équation des travaux des forces qui ont agi pendant toute la course est :

$$(P' + Q - P) H + (P' + Q - P) h' - (P + P' + Q) Lf - CL = \Sigma F$$

Or notre profil théorique réalise la condition

$$(P' + Q - P) H - (P + P' + Q) Lf - CL = 0$$

d'où

$$(P' + Q - P) h' = \Sigma F.$$

La quantité ΣF représente le travail des freins, il sera toujours positif car $P < P' + Q$, il s'exerce sur la longueur l'' aux abords de R. La pression exercée par les freins dans le sens de la voie, sur les dents de la crémaillère ou sur les rails, aura une intensité $\frac{\Sigma F}{l''}$.

Ce travail est très faible et il est utile d'avoir à sa disposition un excès de force afin d'arriver aux quais des stations. Il n'est, en effet, pas possible pratiquement de proportionner très exactement la charge d'eau et d'évaluer la charge du train montant et les frottements du système ; la vitesse peut par conséquent être inférieure à celle prévue et la puissance vive deviendrait insuffisante pour achever la course.

Lorsqu'on aurait établi le profil en long selon les prescriptions théoriques qui précèdent, on sera assuré de réaliser la traction avec la plus grande économie d'eau et d'usure des freins et il sera même prudent de donner aux réservoirs d'eau une contenance un peu supérieure à celle strictement nécessaire afin de pouvoir disposer, si l'expérience le montre utile, d'un surplus de pouvoir moteur.

Il serait donc oiseux de chercher à annuler complètement le rôle des freins, nous nous bornerons à dire qu'on y arriverait

facilement en combinant un adoucissement de la pente inférieure avec une augmentation de la pente supérieure.

En appliquant nos données numériques aux formules obtenues on a : en faisant $v = 4$ m. et $l'' = 100$ $h' = 1^{m}90$ d'où $K = 201^{m}90$, $\sin \alpha'_1 = 0{,}165$ $\Sigma F = 1619$ km. et la pression des dents sur la crémaillère $16^{kg}19$.

La vitesse avec laquelle le train aborderait le heurtoir terminal, si l'on ne faisait pas usage des freins, serait de $1^{m}28$ par seconde.

Nous avons fait abstraction jusqu'ici des stations intermédiaires qui pourraient être desservies par les trains. L'arrêt occasionnant la perte de la puissance vive, il est nécessaire de la restituer aux trains, soit par le moyen d'une augmentation de la charge d'eau, soit en aggravant la pente de la voie dans la station et sur une certaine longueur en aval. On calculerait le surpoids d'eau et la hauteur h' comme il a été dit pour les stations extrêmes.

Dans le cas où l'on employerait un surpoids d'eau q, le profil en long ne serait aucunement modifié.

Dans le cas d'une aggravation de pente, chaque station occasionnerait le relèvement de toute la partie du profil située en amont.

S'il y avait, par exemple, deux stations intermédiaires, équidistantes du croisement, on aurait pour ordonnées du profil de la voie les valeurs de y données par l'équation 9 entre R et la première station. Entre celle-ci et la suivante les ordonnées seraient $y + h'$ et pour la fin du tracé jusqu'en T $y + 2h'$.

La hauteur totale $K = 3h' + H$.

On en déduirait H comme il a été dit ci-dessus.

B. *Profil en long de formes diverses.*

Dans l'étude du profil en long théorique, nous avons fait abstraction de la forme du terrain naturel afin de chercher les conditions les plus favorables à l'exploitation. Ce profil sera parfois réalisable, car on rencontre assez souvent des flancs de coteau dont la pente décroît vers la base. Dans d'autres cas on

devra se résoudre à adopter un profil moins avantageux et même à renoncer au système de contrepoids d'eau pour adopter un moteur.

Lorsqu'il n'est pas possible d'adopter le profil théorique, on devra chercher à réaliser la condition de symétrie des pentes exprimée par les équations 1 à 3 que nous avons données ci-dessus.

Le procédé le plus simple de les étudier consiste à se donner le point de croisement dont la hauteur au-dessus de l'extrémité inférieure doit être moindre que $\frac{H}{2}$, puis de choisir une pente, $sin\ \gamma$, pour cette partie de la voie ; l'équation 3 donnera la valeur du contrepoids d'eau, pour $F'' = 0$:

$$Q = \frac{(P - P')\ sin\ \gamma + (P + P')\ f + C}{sin\ \gamma - f}$$

Nous nous donnons de même la condition que les freins n'ayent à agir dans la partie inférieure du tracé que pour détruire la puissance vive au moment d'entrer en station, on a donc d'après l'équation (2) $F' = 0$ et

$$(P' + Q)\ sin\ \beta - P\ sin\ \alpha + p\,H - (P + P' + Q)\ f - C = 0$$

Nous nous donnons $sin\ \beta$, c'est-à-dire la pente de la partie inférieure du tracé, ce qui détermine celle de la partie supérieure $sin\ \alpha$.

L'équation (1) donnera la valeur de F c'est-à-dire la force motrice qui n'est pas absorbée par le train montant et les frottements du système. Cette force doit être positive. Si elle était négative cela indiquerait que $sin\ \beta$ est trop grand ou Q trop petit pour cette partie du tracé. Si elle était nulle on ne disposerait d'aucune force pour démarrer les trains et leur donner la vitesse voulue.

Lorsque F est positif on déterminera la longueur l'' du parcours au bout duquel les trains auront acquis la vitesse v en employant la formule déjà expliquée :

$$F\,l'' = \frac{P + P' + Q + p\,L + G}{2\,g}\,v^2$$

Au delà de cette longueur les freins exerceront sur la crémaillère une pression égale à F.

Si les résultats de cette première étude sont convenables on achèvera l'étude du profil en distribuant les pentes selon les conditions de l'équation (2) en s'assurant toujours que l'équation (1) donne à F des valeurs nulles ou positives.

Dans le tracé du profil en long on ne devra pas perdre de vue que les pentes successives doivent être raccordées par des arcs paraboliques ou des arcs de cercle à grands rayons, ainsi que nous le verrons au § 4 ci-après.

Ces diverses conditions sont réalisées par les deux profils types fig. 4 et 5; dans la première de ces figures la pente maximale est au haut du plan incliné, dans la seconde elle se trouve au croisement. Dans tous les cas on doit avoir $\alpha > \beta$.

En appliquant au type fig. 4 les données numériques indiquées dans notre exemple de profil théorique nous aurons les résultats suivants :

Si la pente du terrain naturel au croisement est de 0,05 nous aurons $\sin \gamma = 0{,}05$ d'où $Q = 7340$ kg.; nous nous donnons en outre $\sin \beta = 0{,}20$ ce qui exige que $\sin \alpha = 0{,}273$ et $F = 1248$ kg.

Ce profil est donc plus défavorable que le profil théorique au point de vue de la dépense d'eau, mais sera parfois moins coûteux à construire.

§ 2. Plans automoteurs.

Les plans automoteurs ne diffèrent des plans inclinés à contrepoids d'eau que par la nature de la charge motrice. Ils ont reçu de nombreuses applications dans les exploitations de mines ou carrières situées à flanc de coteau. Les vagons montants sont vides ou à peu près vides, tandis que le vagon descendant est chargé de matériaux. On n'a plus à rechercher les conditions qui rendent Q un minimum, mais au contraire celles qui permettent le plus fort chargement des vagons descendants compatible avec la sécurité.

Les équations d'équilibre des forces et des travaux Nos 1, 2, 3, 4, sont applicables au cas présent à la seule différence que Q désignera la charge de matériaux et que P et P′ sont habituellement égaux.

Il est évident que le profil en long le plus favorable sera celui qui rendra nul le travail des freins, ou qui le restreindra à annuler la puissance vive à la fin de la course. Nous nous retrouvons ainsi dans des conditions identiques à celles qui nous ont amené au profil dit *théorique* et aux conditions des profils de diverses formes examinés ci-dessus.

Les vagons n'étant pas accompagnés par des serre-freins, on agit sur le câble au moyen de freins à ailettes, ou autres, placés à la station supérieure. Ces freins peuvent être beaucoup plus puissants que ceux à crémaillère fixés aux vagons. Il en résulte que la distribution des pentes a beaucoup moins d'importance que dans le système à contrepoids d'eau.

§ 3. Plans inclinés avec moteur.

Ce système a l'avantage de s'accommoder de profils en long qui seraient très défavorables au système à contrepoids d'eau et de permettre l'emploi de trains composés de plusieurs voitures lourdement chargées et de diverses provenances. Tel est le cas du funiculaire de Lausanne à Ouchy qui est actionné par un moteur hydraulique. Le train montant est parfois de 40 tonnes tandis que le train descendant est de 20 tonnes. Il admet des vagons provenant des chemins de fer ordinaires. Dans le cas où l'on eût voulu faire le même service avec un contrepoids d'eau, le volume des réservoirs aurait été de 60 mètres cubes. Il serait impossible de les loger sous les trois voitures qui forment le train normal.

En conservant les notations employées dans l'étude des chemins à contrepoids d'eau, et en désignant par D la force de traction exercée sur le câble par le moteur, l'équation d'équilibre des forces est :

$$D + P' \sin \alpha = P \sin \beta + p\,h + (P + P')\,f + C + F$$

l'équation des travaux pour la course entière est

$$D\,L + (P' - P)\,H - (P + P')\,L\,f - C\,L = \Sigma\,F$$

Il est évident que la force en chevaux du moteur et sa consommation d'eau ou de charbon seront des minima si $\Sigma\,F$ est nul et si le travail par seconde $D\,v$ est constant sur toute la ligne. Lorsque v est constant D doit l'être aussi et nous nous retrouvons dans des conditions semblables à celles qui nous ont conduit à l'équation (9) de la courbe du profil théorique.

Dans notre cas

$$M = \frac{D - (P + P')\,f - C}{P - P'}$$

et

$$N = \frac{p}{P + P'}$$

Pour un profil quelconque on recherchera quelle est la position des trains qui donne à D sa valeur maximale en calculant la formule

$$D = [P \sin \beta - P' \sin \alpha \pm p\,h + (P + P')\,f + C$$

dans laquelle le terme $p\,h$ est positif lorsque le train descendant est en amont du croisement et négatif quand il est en dessous.

Le démarrage exige du moteur une force supplémentaire

$$d = \frac{P + p\,l''' + G''}{l''}\,\frac{v^2}{2\,g}$$

l''' et G'' désignant la longueur de câble et le poids des galets compris entre le moteur et la station d'où part le train montant.

La force du moteur et sa dépense en eau ou charbon dépendent du produit $D\,v$ et non de la traction D. On aura donc la ressource de réduire la vitesse dans les parties du tracé ou D est maximum et l'on obtiendra ainsi un travail à peu près constant du moteur. Les freins ne sont employés que pour les cas de rupture de câble et pour détruire la puissance vive des trains au moment où le moteur s'arrête. On évite ainsi des à coup dangereux pour le câble. En résumé, la forme du profil

en long la plus avantageuse pour un funiculaire à moteur est encore le profil théorique déterminé ci-dessus, mais on peut s'en écarter avec moins d'inconvénients que pour les funiculaires à contrepoids d'eau.

§ 4. Raccordement des pentes.

Les raccordements de deux pentes successives du profil en long sont convexes ou concaves, dans le premier cas la tension produite sur le câble n'a d'autre résultat que de l'appliquer plus fortement sur ses galets de support et nous verrons plus loin quelle est l'intensité de cette force.

Lorsque la courbe est concave la traction opérée par le poids des trains tend à soulever le câble et il importe qu'il ne sorte pas de la gorge de ses galets.

En effet, lorsque le câble se détend il est très exposé à tomber à côté des galets et à s'y détériorer gravement par son frottement contre leurs paliers et sur l'aire de la voie. L'action du vent et surtout la traction oblique produite par les sinuosités de la voie amènent ce résultat. Nous avons donc à déterminer la courbe que forme un câble soumis à la plus forte tension qui puisse se produire dans l'exploitation d'un chemin de fer funiculaire. Les galets devront être disposés selon cette courbe ou au-dessus d'elle, mais jamais en dessous.

On sait qu'un fil homogène suspendu librement et soumis à une tension forme une courbe nommée chaînette. Lorsque la flèche de cette courbe est petite relativement à sa longueur, elle se confond avec une parabole, car on peut considérer le poids du fil ou du câble comme uniformément réparti sur la corde.

En désignant par p le poids du câble par mètre courant, son poids par mètre courant de projection horizontale sera

$p_1 = \frac{p}{\cos \delta}$ en désignant par $tg\ \delta$ la pente moyenne de la région considérée.

Soient S A et S B (fig. 6) les directions des deux forces qui

tendent le câble, elles sont parallèles aux deux lignes de pentes à raccorder et font avec l'horizontale les angles α et α'. Le point S est déterminé ainsi que ces pentes et le poids p_1 du câble; nous nous proposons de calculer les longueurs des tangentes à la parabole S A et SB, l'équation de la courbe, la hauteur Sn et la flèche $nm = f$. L'arc parabolique A B, rapporté à l'horizontale et à la verticale passant par A, a pour équation :

$$y = (d + 4f)\frac{x}{l} - 4f\frac{x^2}{l^2} \qquad (1)$$

Il appartient à une parabole dont l'axe est vertical et dont le sommet a pour ordonnées

$$x_1 = \frac{d + 4f}{8f}l \text{ et } y_1 = \frac{(d + 4f)^2}{16f}$$

ainsi qu'il est aisé de le prouver par les propriétés bien connues de cette courbe, mais nous ne nous y arrêterons pas. Les dérivées de l'équation de la courbe donnent

$$tg\,\alpha = \frac{d + 4f}{l} \qquad tg\,\alpha' = \frac{d - 4f}{l}$$

En additionnant ces deux valeurs on a $d = \frac{l}{2}(tg\,\alpha + tg\,\alpha')$ (2)

en les retranchant l'une de l'autre $f = \frac{l}{8}(tg\,\alpha - tg\,\alpha')$ (3)

Ecrivons maintenant les équations d'équilibre des forces

autour de A $$\frac{p_1 l^2}{2} - V_1 l - H d = 0$$

autour de n $$\frac{p_1 l^2}{8} - H\left(\frac{d}{2} + f\right) - V_1 \frac{l}{2} = 0$$

V_1 désigne ici la composante verticale de la tension T_1 en B et H la composante horizontale qui est, on le sait, la même en tous les points de la parabole.

On tire de ces deux équations la valeur de V_1 puis celle de

$$H = \frac{p_1 l^2}{8f} \text{ d'où } f = \frac{p_1 l^2}{8H}$$

$$\text{Or } H = T_1 \cos \alpha' = T \cos \alpha \text{ d'où } f = \frac{p_1 l^2}{8\, T_1 \cos \alpha'}$$

en remplaçant f par cette valeur nous obtenons :

$$l = \frac{T' \cos \alpha'}{p_1} (tg\, \alpha - tg\, \alpha')$$

$$\text{ou } l = \frac{T \cos \alpha}{p_1} (tg\, \alpha - tg \alpha') = \frac{T}{p} (tg\, \alpha - tg\, \alpha') \qquad (4)$$

Nous ne nous arrêterons pas à prouver que le sommet d'angle des pentes S se trouve à égale distance $\frac{l}{2}$ des verticales passant par A et par B. Cette propriété des tangentes à la parabole dérive facilement de son équation générale.

La longueur l étant déterminée par les données du problème, on calculera les valeurs de d et de f. On en déduira la longueur des tangentes

$$S\,A = \frac{l}{2 \cos \alpha} \qquad S\,B = \frac{l}{2 \cos \alpha'} \qquad (5)$$

et la hauteur $S\,n = \frac{l}{2}\, tg\, \alpha - \left(\frac{d}{2} + f\right)$. En remplaçant d et f par leurs valeurs (équations 2 et 3) on trouve $S\,n = f$. (6)

La courbe de raccordement est ainsi entièrement déterminée par les équations Nos 1 à 6 ci-dessus. Elle pourra être piquetée sur le terrain aussi facilement qu'un raccordement en arc de cercle. On peut, du reste, substituer à la parabole un arc de cercle à condition de s'assurer qu'aucun des points du raccordement ne soit en contre-bas de la parabole.

La longueur du câble entre les points A et B est égale à

$$l + \frac{d^2}{2\,l} + \frac{8\,f^2}{3\,l}.$$

La longueur horizontale du raccordement désignée ci-dessus par l dépend, comme nous le dit l'équation 4, du rapport $\frac{T}{p}$, c'est-à-dire de la tension maximale que peut supporter avec entière sécurité un câble de 1 km. par mètre. Ce rapport varie

beaucoup avec la qualité du fer. Les meilleurs câbles d'acier ne rompent que sous une charge égale à 16 400 fois leur poids par mètre courant, ceux d'une fabrication ordinaire ne supportent que 11 800 fois leur poids par mètre courant. En admettant que la tension maximale du câble au moment des arrêts et des démarrages les plus brusques ne doive pas dépasser le $^1/_5$ de la charge de rupture, la valeur de $\frac{T}{p}$ sera au minimum de 2360 et peut atteindre 3280 avec les meilleurs aciers. Cette valeur servira pour l'étude du profil en long d'un avant-projet avant que de connaître T et p.

On constatera que le profil théorique étudié au § 1er a toujours une flèche moindre que celle strictement nécessaire pour que le câble reste sur ses galets. Dans notre exemple numérique, il faudrait une tension de 84 300 kg. environ pour tendre un câble de 1kg5 par mètre sur 1500 m. de longueur jusqu'à ce que sa flèche soit de 5 m. comme celle de notre profil. Or la tension maximale ne dépassera pas en pratique 4000 kg.

La formule à employer pour cette vérification est $T = \frac{p L^2}{8 f}$, elle dérive de la valeur $f = \frac{p_1 l^2}{8 T_1 \cos \alpha'}$ dans laquelle on remplace p_1 par $\frac{p}{\cos \alpha'}$, et l^2 par $L^2 \cos^2 \alpha'$.

On n'aura donc à se préoccuper de raccorder les pentes que dans l'étude de profils qui s'écartent du profil théorique, tels que ceux décrits au § 1er, B.

Il peut arriver que le voisinage d'une traversée de route au-dessus de la voie ferrée, ou telle autre circonstance, empêche d'établir le raccordement des pentes d'une manière satisfaisante.

Dans ce cas, on devra maintenir le câble sur ses galets au moyen de galets auxiliaires placés au-dessus du câble, mais laissant libre passage au vagon. Au Territet-Glion, on a adopté

un système fort ingénieux, qui fonctionne bien, mais a l'inconvénient d'exiger l'arrêt momentané du train à chaque passage près de l'appareil.

Le galet auxiliaire est monté sur un long bras qui est horizontal dans sa position normale et pivote autour d'un axe incliné placé en dehors de la voie. Le vagon montant rencontre le bras placé en travers de la voie, il l'aborde doucement et le range de côté. Le vagon descendant le replace au-dessus du câble dès qu'il a passé.

Le poids de l'appareil exige que ces mouvements automatiques s'opèrent sans vitesse, de sorte que ce système n'est pas admissible sur un funiculaire à moteur ou automoteur dont les arrêts sont commandés dès l'extrémité de la ligne. Nous proposerions de préférence le système esquissé, fig. 7, qui serait moins coûteux et n'exigerait aucun arrêt des trains. Il restreindrait, il est vrai, la place libre sous le vagon, ce qui serait parfois gênant pour placer des réservoirs d'eau.

Au-dessus du point S, où se coupent les lignes de pentes, on placerait un galet sans gorge G porté par un axe horizontal en porte à faux et, à quelque distance, deux galets coniques, A et B. Entre ceux-ci la voie serait déviée d'une quantité suffisante pour que l'amarre du câble puisse passer à côté du galet G. Le vagon descendant pourrait ainsi trajeter librement; puis, lorsqu'il aurait dépassé le point B, le câble, raidi par la tension, viendrait s'engager sous le galet G qui empêcherait tout soulèvement ultérieur.

CHAPITRE III

Résistances au mouvement des trains.

Nous avons à évaluer les résistances que les trains et le câble opposent au mouvement et qui figurent dans nos formules des §§ 1, 2 et 3 sous lettres *f* et C.

§ 5. Valeur du coefficient f.

Nous avons désigné ainsi le coefficient de résistance au roulement sur une voie de niveau. Il dépend de l'état de la voie, de la construction du vagon et de son graissage. Parmi les nombreuses formules proposées pour le déterminer, nous signalerons celle établie, pour les voitures de voyageurs, par M. l'ingénieur Desdouits, (*Annales des ponts et chaussées* 1886.) En employant le matériel ordinaire des chemins de fer, dans leur état de graissage usuel, il est arrivé à

$$f = 1^{kg}6 + 0{,}0003\ V^2$$

f désigne le frottement par tonne, V est la vitesse en kilomètres à l'heure.

Pour une vitesse de 4 m. par seconde, $f = 1^{kg}67$ par tonne. Le passage dans une courbe de 500 m. de rayon augmenterait cette résistance de 1 kg. au maximum par tonne.

Dans nos applications, nous avous fait $f = 3$ kg. par tonne, en tenant ainsi compte, autant que faire se peut, de la résistance supplémentaire opposée par les freins à crémaillère dont le frottement peut être très minime lorsqu'ils sont entièrement desserrés.

§ 6. Valeur de C.

Nous avons désigné ainsi la force nécessaire pour faire mouvoir le câble sur ses galets, en admettant qu'il est assez tendu pour ne toucher le sol en aucun point.

En l'absence d'expériences directes, nous chercherons à évaluer cette force de la manière suivante :

a) Dans les parties de la voie en alignement droit et en pente uniforme, le câble est supporté par des galets à axes horizontaux et il peut presque être assimilé à une barre rigide, lorsqu'il est tendu.

Si donc nous désignons par D le diamètre de la gorge des

galets, par d celui de leurs tourillons et par f' le coefficient de frottement de ceux-ci sur leurs paliers, le câble exigera une

$$\text{force } c = \frac{p\,L\,d}{D} f'$$

$$\text{Le rapport } \frac{d}{D} = {}^1/_{10} \text{ environ et } f' = 0{,}08.$$

d'où $c = 0{,}008\, p\, L$. Nous rappelons que p est le poids par mètre courant de câble et L sa longueur.

b) Dans les parties de la voie qui présentent des courbes en plan et dans les raccordements de pentes convexes du profil en long, la tension du câble produit des frottements contre les galets verticaux ou horizontaux. Soit (fig. 8) l la distance entre deux galets, O le centre de la courbe, R son rayon. La tension T du câble qui s'infléchit sur le galet produit une résultante $= T \frac{l}{R}$ et la force absorbée par chaque galet sera $\frac{l\,T}{R} \frac{d}{D} f'$

Pour une courbe ayant un angle au centre β il faudra

$$n \text{ galets, or } \frac{n\,l}{R} = 2\,\pi \frac{\beta}{360^\circ}$$

Les frottements produits par la courbe entière seront donc

$$2\,\pi \frac{\beta}{360} \frac{T\,d}{D} f' = 0{,}05 \frac{\beta}{360} T$$

Il se produira sans doute quelques pertes de force à cause de la raideur du câble. Nous ne saurions comment les apprécier et nous nous bornerons à majorer les résultats obtenus.

c) La poulie au sommet du plan incliné produira une perte

$$\text{de force} = 2\,T \frac{d}{D} \times 0{,}08 = 0{,}016\,T$$

La raideur du câble produira d'après la formule de Redtenbacher une perte de force $= T \left(\frac{0{,}109}{D} + \frac{0{,}203}{T} \right) \delta^2$ dans laquelle δ est le diamètre du câble exprimé en centimètres ainsi que D.

Avec les proportions ordinaires, on peut remplacer cette formule par $(0{,}0011\ \delta + 0{,}0005)$ T et même par 0,004 T pour un câble de grosseur moyenne.

d) Les galets sont mis en mouvement les uns après les autres par le câble et prennent très rapidement sa vitesse. Il y a là une force d'inertie à vaincre que nous évaluons à 16 kg. en admettant que le galet pèse 35 à 40 kg. et prenne la vitesse de 4 m. en $^1/_2$ seconde.

En additionnant toutes les résistances énumérées ci-dessus et en ayant soin de les majorer pour tenir compte du travail de flexion auquel donne lieu le passage sur chaque galet, nous obtiendrons une valeur suffisamment approchée du terme C qui figure dans nos calculs.

On remarquera que les courbures de la voie nécessaires au croisement des trains et les raccordements de pentes ont une très faible influence sur la valeur de C. Les quatre courbes d'un croisement donnent une perte de force de

$$0{,}05 \frac{16^\circ}{360} \text{ T} = 0{,}0022 \text{ T};$$

un raccordement de pentes de 8° au centre donne une perte de force de 0,0011 T.

La formule suivante dans laquelle nous avons groupé ensemble les coefficients de T donnera la valeur de C et sera applicable à la plupart des tracés :

$$\text{C} = 0{,}008\, p\text{L} + 0{,}03 \text{ T} + 16$$

Telle est approximativement la force absorbée par le mouvement du câble.

La tension T qui entre dans ces calculs est variable, mais il serait bien inutile de tenir compte de cette variabilité dans le calcul de C, qui n'a qu'une influence secondaire dans nos équations d'équilibre. On prendra pour T la tension maximale du câble, abstraction faite de celle nécessaire au démarrage.

CHAPITRE IV

Engins spéciaux, voie et exploitation.

§ 7. Distance des galets.

Les galets sont de petites poulies à gorge profonde, montées sur des paliers à coussinets de bronze, munis d'un moyen de graissage.

Nous donnons aux fig. 9 et 10 les croquis des galets du Territet-Glion. Le type fig. 9 s'emploie dans les parties rectilignes de la voie, le type 10 dans les courbes du croisement. Il remplace les galets verticaux.

Les galets doivent être assez rapprochés pour que le câble ne traîne jamais sur le sol, même lorsqu'il est mis en mouvement par la plus faible traction qui puisse se réaliser dans l'exploitation de la ligne. Nous calculons cette distance comme suit :

Soit T la tension minimale du câble, $tg\ \alpha$ la pente de la voie entre les deux galets A et B (fig. 6), f la hauteur verticale mn. de la gorge des galets au-dessus du sol, p le poids par mètre courant de câble. Nous avons vu au § 4 que la composante horizontale de la tension du câble a pour valeur :

$$T \cos \alpha = \frac{p_1 l^2}{8 f} \qquad \text{d'où } l = \sqrt{\frac{8 f T \cos \alpha}{p_1}}$$

En nommant l' la distance A B, nous avons

$$l' = \frac{l}{\cos \alpha} \qquad p_1 = \frac{p}{\cos \alpha} \qquad \text{d'où } l' = \sqrt{\frac{8 f T}{p}}$$

Au chemin de fer de Lausanne à Ouchy, les premiers galets étaient en fonte sans aucune garniture, mais on constata bientôt qu'ils s'usaient rapidement et d'une manière irrégulière, ce qui était préjudiciable à la durée du câble. Ils furent successivement remplacés, sur la proposition de notre collègue, M. Cor-

naz, par des galets munis d'une bague de caoutchouc qui a donné de bons résultats. Le diamètre de la gorge est de 300 mm. Au Territet-Glion, on a préféré garnir le fond de la gorge des galets d'une composition de 10 % de cuivre, 10 % d'antimoine et 80 % d'étain. La gorge a 240 mm. de diamètre.

§ 8. Le câble.

Les câbles sont généralement préférés aux chaînes à cause de leur beaucoup plus grande résistance à poids égal et surtout parce que les chaînes, même les mieux faites, rompent parfois sans qu'il soit possible de le prévoir.

Les chaînes présentent cependant l'avantage de pouvoir s'enrouler sur des poulies ou pignons de faible diamètre et de fournir sur toute leur longueur des points d'attache.

Les chemins de fer qui transportent des voyageurs mettent la plus grande importance à la sécurité et n'emploient que des câbles.

Depuis qu'on sait fabriquer des fils d'acier de grande longueur, on les préfère aux fils de fer en raison de leur grande résistance et de leur homogénéité.

Ceux employés à la construction des câbles ont un diamètre de 1 $^1/_2$ à 3 mm. et présentent une telle ténacité qu'ils ne se rompent que sous une charge de 110 à 170 kg. par millimètre carré de section transversale.

En tordant ensemble un certain nombre de ces fils, on obtient un *toron*.

Le câble est composé de plusieurs torons tordus autour d'une âme en chanvre qui lui donne une certaine flexibilité.

D'après des expériences faites au Creuzot, la torsion diminue la résistance des fils, de sorte qu'un câble n'a guère que les $^4/_5$ de la résistance totale des fils qui le composent. Lorsqu'on détermine les dimensions à donner à un câble, il faut tenir compte du fait que sa résistance diminue avec l'usure.

Il convient donc de lui donner une section supérieure à celle qu'exigerait la sécurité.

Au Lausanne-Ouchy et au Territet-Glion, les câbles neufs ne travaillent qu'au $^1/_{10}$ de leur charge de rupture. Ce rapport n'a rien d'absolu et nous pensons qu'on pourrait adopter des dimensions moindres pour les chemins de fer à faible trafic.

Les câbles sont revêtus d'une couche de goudron qui prévient la rouille et diminue l'usure. Le mélange de goudron de Norvège, d'huile et de colophane employé au Lausanne-Ouchy et au Territet-Glion donne de bons résultats. Cet enduit doit être renouvelé dès que le câble paraît blanc.

Usure. — Le remplacement des câbles constitue une dépense importante, mais il est plus important encore d'éviter toutes chances de rupture de cet organe essentiel. Quelle que soit la puissance des freins, il est toujours à craindre que leur fonctionnement soit tardif lorsque le câble vient à se rompre inopinément. Or tout retard permet au train d'acquérir une puissance vive extrêmement dangereuse.

Il est donc de la plus haute importance d'observer le câble et de se rendre compte fréquemment de sa résistance. On ne peut pas prélever des échantillons sur un câble en service, mais l'expérience a prouvé que la simple observation de l'usure extérieure suffit pour dénoncer le moment où il convient de le remplacer.

On a constaté en effet, en détordant des câbles usagés, que les fils intérieurs s'usent très peu, ils se polissent les uns contre les autres surtout entre torons, mais l'usure de beaucoup la plus importante a lieu à l'extérieur du câble où il est facile de la constater et même de la mesurer pour se rendre compte de la diminution de section métallique.

La qualité des aciers fondus tréfilés varie notablement d'une usine à l'autre et même d'un câble à l'autre de la même usine, aussi ne pouvons-nous pas indiquer de règles générales pour déterminer le moment où un câble doit être remplacé. Le département fédéral des chemins de fer indique, dans sa circulaire de février 1885, « que la tension maximale du câble, y compris la fatigue sur les poulies, ne doit pas excéder le quart de la charge de rupture en tenant compte de la diminution de

section par l'usure. » Il serait sans doute plus scientifique d'observer l'allongement du câble sous des charges connues et de le mettre hors de service dès que ces allongements deviendraient permanents, ce qui indiquerait que l'élasticité est altérée, mais le câble, renfermant une âme en chanvre, s'allonge déjà lorsqu'il est neuf et il n'est guère possible de déterminer pratiquement le moment où l'allongement provient de l'extension des fils.

Sur les chemins à faible pente, le mesurage de la longueur est compliqué encore de la résistance variable que les galets opposent à la tension du câble. Nous avons dû y renoncer complètement pour le Lausanne-Ouchy.

La durée moyenne de trois câbles de ce même chemin de fer a été de deux ans, pendant lesquels chacun d'eux a actionné 26 500 trains. Le parcours kilométrique du câble a été donc de 40 000 kilomètres.

Le dernier câble n'a été usé qu'après 1226 jours de service. Son parcours kilométrique a été de plus de 66 000 kilomètres. Il est en acier anglais trempé. Sa longue durée peut être attribuée, au moins en partie, à l'introduction de plus en plus complète de galets à gorge de caoutchouc.

Calcul de la tension maximale du câble. — La tension maximale à laquelle le câble peut être exposé se compose des éléments suivants :

1° La composante du poids du train et du câble lui-même, augmentée de la force nécessaire pour vaincre les résistances passives.

On aura à chercher quelle est la position du train qui donne la plus grande valeur à l'expression

$$P \sin \alpha + ph + Pf + \frac{Cl}{L}$$

dans laquelle P désigne comme précédemment le poids du train montant, $tg\ \alpha$ la pente de la voie au point considéré, p le poids par mètre courant de câble évalué approximativement, h la projection verticale du brin montant, f le coefficient de frotte-

ment du train, C le coefficient de frottement du câble, L sa longueur totale et l celle du brin montant.

Dans l'exemple numérique traité au § 1, on obtient pour la position inférieure du train montant 1743 kg., et pour sa position supérieure 1639 kg.

2° Nous avons vu que le démarrage exige une force supplémentaire dont la valeur est pour le train montant $\frac{P + pl + G}{2gl'} v^2$ formule dans laquelle G indique le poids des galets et poulies supportant le brin montant et l' la longueur parcourue par le train pour acquérir la vitesse v.

Dans notre exemple numérique on aurait pour $l' = 100$ m. et $v = 4$ m. une force supplémentaire de 132 kg. à ajouter aux 1743 kg. trouvés ci-dessus, total 1875 kg.

3° Le câble subit une certaine fatigue en s'infléchissant sur les galets et sur les tambours et poulies de renvoi.

Reuleaux, dans son ouvrage *le Constructeur*, a cru pouvoir évaluer cette tension par la formule $S = 10000 \frac{d}{R}$ dans laquelle d désigne le diamètre des fils et R le rayon de la poulie.

Cette formule dérive évidemment d'une assimilation erronnée de la flexion d'un fil à celle d'une pièce rigide.

En effet, la théorie de la flexion plane des solides donnerait l'égalité bien connue $\frac{EI}{R} = \frac{SI}{\frac{d}{2}}$ d'où $S = E \frac{d}{2R}$.

Or E = 20 000 par millimètre carré. On aurait donc comme Reuleaux, $S = 10000 \frac{d}{R}$.

Si cette assimilation était exacte, un fil de fer ordinaire de 2 mm. de diamètre enroulé sur une poulie de 0^m20 de rayon devrait rompre, car sa tension s serait de 100 kg. par millimètre carré, ce qui n'a pas lieu. L'expérience prouve qu'on

peut enrouler ce fil sur des poulies plus petites encore, sans qu'il présente aucune trace de rupture.

Cette anomalie provient de ce que les formules de la flexion plane des solides sont basées sur plusieurs hypothèses qui ne sont plus admissibles dès que la flexion est très grande relativement aux dimensions du solide. La formule de Reuleaux donne donc des résultats très exagérés pour la fatigue d'un fil courbé sur une poulie.

Si nous considérons un des fils d'un câble, nous remarquerons qu'il décrit une courbe hélicoïdale complexe, car il participe à l'enroulement des torons. Il est tantôt comprimé, tantôt tendu par l'enroulement du câble sur la poulie, de sorte que ces actions peuvent s'annuler par un simple glissement des fils les uns sur les autres. En outre l'âme en chanvre est compressible, ce qui modifie les réactions des fils les uns sur les autres.

Nous en concluons que le phénomène de l'enroulement d'un câble sur une poulie donne lieu à des tensions moléculaires très compliquées, mais dont l'intensité est certainement de beaucoup inférieure à celle indiquée par la formule ci-dessus.

L'influence des galets qui ne font que guider ou supporter le câble est encore plus difficile à apprécier, car celui-ci s'infléchit selon une courbe dont la forme dépend surtout de sa raideur, de sa tension et de son poids.

En résumé, nous estimons qu'on peut négliger l'influence des poulies et galets dans le calcul de la tension maximale du câble, le coefficient de sécurité suffisant largement pour ces tensions d'ordre secondaire.

Il n'en faudrait cependant pas inférer qu'on puisse, sans inconvénient, multiplier les poulies de renvoi, car elles augmentent notablement l'usure du câble.

Nous extrayons de nos notes les dimensions et résistances de quelques câbles employés depuis plusieurs années.

La résistance des fils isolés du meilleur des câbles du Lausanne-Ouchy a atteint 179 kg. par millimètre carré et le câble entier a montré une résistance de 140 kg. par millimètre carré de section métallique. L'expérience des câbles n'est pas encore

assez longue pour qu'on puisse définir la qualité d'acier et le genre de trempe qui convient le mieux. Les tréfileries ont fait de grands progrès depuis quelques années et en feront encore.

CHEMIN DE FER	DIAMÈTRE		NOMBRE		POIDS	Charge de rupture par mm² de section métallique
	du câble	du fil	de torons	de fils	par mètre	
	mm.	mm.			Kg.	
Lausanne-Ouchy..	30	2	6	114	3.20	134
Lausanne-Gare ...	27	1.8	6	114	2.50	108
Giessbach	23	2	5	70	—	107
Territet-Glion	32	1.9	7	133	3.60	145
Lyon-Croix-Rousse	—	2	7	253	—	128

Amarre du câble. — Les vagons du funiculaire Lyon-Croix-Rousse sont amarrés au câble par l'intermédiaire d'une grande pièce en fonte dont la forme rappelle le profil d'une poire. Le câble s'enroule autour du gros bout et est épissé sur lui-même vers l'extrémité pointue de l'amarre. Ce système est solide, mais d'une exécution moins facile que celui que nous avons proposé en 1875 pour le Lausanne-Ouchy. Ce système d'amarre était déjà usité et favorablement connu aux Etats-Unis pour fixer les extrémités des câbles des ponts suspendus. Il a été imité dès lors sur plusieurs chemins funiculaires où il a donné les meilleurs résultats. Un serrurier quelconque peut placer facilement le câble dans la pièce d'amarre, car il suffit de détordre l'extrémité du câble après l'avoir enfilé dans le trou troncconique *ab* (fig. 11) puis de replier les bouts des fils sur eux-mêmes et de les agglutiner ensemble en fondant du plomb ou du zinc. Les Américains y chassent en outre des clous, mais cela n'est pas nécessaire. Cette pièce est soutenue par une chaînette afin d'éviter qu'elle ne butte contre les galets. Elle s'ac-

croche par une forte boucle à l'extrémité de la barre d'attelage qui agit sur le châssis du vagon par l'intermédiaire d'un ressort de traction *t* (fig. 13). Planche 8.

La figure 11 donne la forme et les dimensions de l'amarre du Lausanne-Ouchy.

Epissure. — Lorsqu'un câble vient à se rompre, ses tronçons peuvent être rejoints au moyen d'une épissure. Pour cela on détord les torons des deux extrémités sur six mètres de longueur par exemple; puis on raccourcit le premier toron de 1 m., le second de 2 m. et ainsi de suite, puis on retord les torons ensemble de manière à croiser les joints. Lorsque ce travail est fait par un ouvrier exercé, le câble ne perd rien de sa solidité et son diamètre reste à peu près le même.

§ 9. Les freins.

Les freins des chemins de fer funiculaires ont à remplir deux fonctions distinctes.

Dans l'exploitation normale ils agissent comme sur les chemins de fer ordinaires pour modérer la vitesse et arrêter les trains aux stations.

En cas de rupture du câble ils ont à fixer le train en détresse sur la voie.

Ces deux rôles peuvent être remplis par des freins ordinaires lorsque la pente est faible, c'est-à-dire en dessous de 10 %. Pour les déclivités plus fortes les roues glisseraient lorsque les rails seraient mouillés.

Au chemin de fer de Lyon à la Croix-Rousse, le frein de détresse agit automatiquement en serrant le rail entre de fortes mâchoires mues par le train lui-même. Ce système fort ingénieux n'a pas été imité à cause de sa complication. Il ne permet aucun croisement de voie.

Le chemin de fer Lausanne-Ouchy présente dans sa partie centrale une pente de 5 ½ % sur 800 m. de longueur. Elle se raccorde en amont avec une pente de 12 % et en aval avec une pente de 7 %.

Dans ces conditions, on a estimé que des freins produisant seulement l'enrayement des roues suffiraient en toutes circonstances et l'expérience a démontré en effet que lorsqu'un train est abandonné à lui-même sur la pente de 12 %, dont les rails sont habituellement humides, il peut être arrêté au bas de cette pente, sans avoir pris de vitesse dangereuse, par l'emploi des freins que nous décrivons ci-dessous.

Ces mêmes freins suffisent aussi pour arrêter un train sur la pente de 7 %.

Les vagons à voyageurs et à marchandises sont tous munis de freins à sabots semblables à ceux des chemins de fer ordinaires, mais très robustes. Le fourgon, qui occupe toujours la position inférieure du train et qui est attaché au câble, est muni de freins à bandes et de freins de détresse que nous décrirons plus loin.

Les freins à bandes sont composés de poulies calées sur chacun des deux essieux du fourgon. Ces poulies sont embrassées par une bande flexible en fer, garnie de plots de bois dur (fig. 12).

En tirant au moyen de leviers et d'une vis la tringle *a-b* on agit sur le levier *cde* qui serre la bande avec une intensité suffisante pour arrêter la rotation de l'essieu et des roues.

Ces freins à sabot et à bandes servent à arrêter les trains aux stations en même temps que le moteur fixe. Leur action est nécessaire pour empêcher les à-coups, désagréables aux voyageurs et dangereux pour le câble, produits par la puissance vive des trains montants. Ceux-ci continueraient quelque peu leur course et reviendraient brusquement en arrière si on ne les enrayait pas à temps.

Le frein de détresse est esquissé fig. 13.

Une chaîne *c* enroulée sur une roue à rochet *r* soutient, par l'intermédiaire de leviers et de tringles, quatre patins *s*. Il suffit au garde-frein de décrocher la roue *r* pour que ces patins tombent sur les rails. Les roues gravissent le petit plan incliné *d* et s'enchâssent dans la partie circulaire des sabots. Le fourgon est ainsi transformé en traîneau et l'expérience a prouvé

qu'il est ainsi plus promptement arrêté que par les autres freins. Dans les deux cas c'est le frottement de fer sur fer qui agit, mais le patin est limé sur une plus grande longueur que a roue par les joints et les aspérités des rails. Ce système a l'inconvénient de produire un choc violent pénible pour les voyageurs et qui fausse les tringles.

Au tronçon de chemin de fer Lausanne-Gare, la pente de de 12 % est suivie par une pente de 2 ½ % de 40 m. de longueur seulement et le vagon-fourgon doit souvent remorquer de lourds vagons à marchandises provenant d'autres compagnies et dépourvus de freins.

Dans ces conditions, le système employé sur la ligne principale ne pouvait pas suffire et l'on a adopté des freins à crémaillères du système Riggenbach. Le vagon-fourgon étudié et construit par cet éminent ingénieur est muni de deux systèmes de freins. Un frein à bandes semblable à celui de Lausanne-Ouchy et un frein automatique esquissé fig. 14. Celui-ci ne sert qu'en cas de rupture du câble. Une forte roue dentée est calée sur l'essieu aval du vagon-fourgon et engrène avec une crémaillère fixée aux traverses de la voie.

La roue dentée est solidaire à deux poulies dont l'une reçoit la bande du frein à main et l'autre les sabots du frein automoteur (fig. 15).

Si le câble venait à se rompre on voit facilement (fig. 14) que le contrepoids *d* ne serait plus soutenu par le levier *abd*. En tombant il tirerait le levier *egh* qui serrerait énergiquement les sabots *g* et *f*.

Ce frein est essayé chaque jour, mais il n'a jamais eu à fonctionner comme frein de détresse.

Le taquet *t* solidaire avec le boulet *q* sert à soutenir le contrepoids lorsque le fourgon circule sur les faibles pentes des stations extrêmes où la tension du câble serait insuffisante.

Des coulisseaux fixés à la voie aux origines de ces pentes obligent le boulet *q* à se mouvoir perpendiculairement au plan de la figure ce qui place ou déplace le taquet *t*.

L'arbre *p* qui les soutient a une section carrée.

Notre notice sur le funiculaire Territet-Glion, insérée dans ce Bulletin en 1885, donne le diagramme et la description des freins.

Ils sont analogues à ceux du Lausanne-Gare, mais agissent sur deux roues dentées. Il y a deux freins à main et un frein automatique à contrepoids. Ceux de nos lecteurs qui désireraient plus de détails sur le funiculaire Territet-Glion, apprendront avec plaisir qu'une monographie due à l'ingénieur Strub est en voie de publication (Sauerländer, éditeur, à Aarau).

Les crémaillères qui fournissent le point d'appui aux freins du Lausanne-Gare, du Giessbach et du Territet-Glion sont semblables comme forme à celles employées sur les chemins dits à crémaillères du Righi, de Rorschach-Heiden, etc. La figure 16 donne la coupe de la crémaillère du Lausanne-Gare.

Les échelons sont espacés de 100 mm. d'axe en axe ; ils sont au niveau des rails, ce qui exige des selles en fonte sous les joints des tronçons de la crémaillère, c'est-à-dire tous les trois mètres et des tasseaux en chêne sur les traverses intermédiaires. Les échelons ont une hauteur de 31 mm. Leur section est un trapèze dont les bases ont 29 et 46 mm. de largeur. Leurs extrémités sont arrondies et pénètrent dans les flancs des fers en U contre lesquels ils sont rivés.

Les tronçons sont éclissés fortement et boulonnés aux traverses de la voie.

L'ingénieur Abt indique dans sa notice, *Die drei Rigibahnen*, que les échelons sont calculés en admettant que la pression des dents ne dépasse pas 6000 kg. et se répartit uniformément sur leur longueur. Il emploie la formule

$$\frac{6000 \times l}{12} = \frac{b\,h^2}{6}\,\mathrm{R}$$

dans laquelle l est la longueur de l'échelon, b sa hauteur et h sa largeur. R est le travail du fer.

Cette formule suppose que la rivure dans les fers en U réalise un encastrement complet.

On donne aux fers en U une section plus forte que celle

qu'exigerait cette tension de 6000 kg. afin de donner de la rigidité à l'ensemble et de les rendre capables de parer à un déraillement.

Le département fédéral des chemins de fer a fait faire (en novembre et décembre 1885) de nombreuses expériences sur les freins des locomotives et vagons des chemins de Vitznau-Righi, Arth-Righi et Rorschach-Heiden, afin de déterminer leur efficacité soit pour retenir un train stationnant sur une voie en pente soit pour l'arrêter lorsqu'il est animé de diverses vitesses.

Nous déduirons de ces expériences quelques résultats qui sont applicables aux vagons de chemins de fer funiculaires.

Les vagons à voyageurs et à marchandises n'ont qu'une seule roue dentée, calée sur l'un des essieux des roues porteuses. Le même essieu porte deux poulies à frein pour les vagons de voyageurs et une poulie à frein pour ceux à marchandises. Ces poulies sont parfois canelées et les sabots qui les frottent ont des canelures correspondantes qui s'enfoncent dans les premières.

Les sabots sont en bois dur et embrassent plus de la moitié de la circonférence de la poulie.

Le diamètre de celle-ci est en général de 500 mm., celui de la roue dentée de 605. Au Rorschach-Heiden, les vagons de voyageurs ont des roues dentées de 637 mm.

Pour expérimenter l'efficacité des freins on faisait stationner un train sur une forte pente et l'on examinait si une seule roue dentée pouvait le maintenir en repos, puis on laissait prendre au train une certaine vitesse et on l'arrêtait au moyen d'un seul frein en notant l'espace parcouru entre le commencement du serrage et l'arrêt complet, ainsi que le temps employé à le parcourir.

Ces expériences avaient avant tout pour but de contrôler l'état du matériel roulant de trois chemins à crémaillères, mais nous pouvons en déduire quelques résultats d'une application plus générale.

1° Lorsqu'un train stationne sur une voie dont la pente est

$tg\ \alpha$, il est sollicité par une force parallèle à la voie dont l'intensité est P $sin\ \alpha$, P désignant le poids du train.

Pour que le train reste immobile, il faut que la roue dentée du vagon expérimenté produise une pression égale à P $sin\ \alpha$ — P f', en désignant par f' le coefficient de frottement au démarrage que nous évaluons à 5 kg. par tonne.

Quelques freins ont supporté une pression de 5900 kg., mais d'autres ont lâché lorsqu'ils étaient soumis à des pressions bien inférieures.

En faisant abstraction de quelques vagons du Rorschach-Heiden qui ont donné les plus mauvais résultats, on peut inférer de ces expériences que des freins en bon état d'entretien et construits comme ceux des lignes du Righi pourront fournir une résistance de 4000 kg. au moins contre les échelons de la crémaillère, ce qui équivaut à 4840 kg. à la jante de la poulie a frein.

2° Lorsque le train est animé d'une vitesse v au moment où l'on commence le serrage des freins, sa puissance vive est $\frac{P\ v^2}{2\ g}$ et il est en outre soumis à l'action de la gravité qui produit un travail $= P\ (sin\ \alpha - f)\ e$,
f désigne ici le coefficient de frottement de roulement $= 0{,}003$ et e l'espace parcouru jusqu'au moment de l'arrêt du train.

Le travail total des freins est donc égal à

$$\frac{P\ v^2}{2\ g} + P\ (sin\ \alpha - f)\ e.$$

et leur travail moyen par mètre parcouru sera

$$\frac{P\ v^2}{2\ g\ e} + P\ (sin\ \alpha - f)$$

Cette formule, appliquée aux expériences les plus caractéristiques donne, pour travail moyen des freins, des valeurs variant entre 1400 et 2600 km. Dans un cas, l'arrêt s'est produit en 3 ″ et le travail moyen a été de 3470 km., mais le vagon s'est sou-

levé. Il pesait 4 tonnes et arrêtait un train de 12 $^1/_2$ tonnes à la vitesse de 1^{m}40. Une autre expérience a donné pour travail moyen 3550 km. Il s'agissait d'un vagon à marchandises qui devait retenir par son seul frein un train de 23 tonnes animé d'une vitesse de 9 m. par seconde sur une pente de 6,8 $^0/_0$. L'arrêt s'est fait après un parcours de 13 m. Les sabots se sont allumés.

Un train de 5 voitures se servant de tous ses freins a donné comme travail moyen par frein 2430 km.

Nous concluons de ce qui précède que la valeur de la pression de la roue dentée contre les échelons de la crémaillère, que nous avons désignée par la lettre F dans notre chapitre II, peut être de 1400 kg. au moins, mais ne doit pas dépasser 2400 kg.

3° On peut prévoir que lorsque le câble romprait et que les freins agiraient tardivement, leurs sabots glisseraient sur les poulies et que la pression de la roue dentée contre la crémaillère n'atteindrait pas 6000 kg. Comme ils sont calculés en vue de cette pression maximale, ils ne rompraient pas, mais si l'on serrait les freins très brusquement, la roue dentée provoquerait le soulèvement du vagon et son déraillement.

Il serait donc plus prudent, dans un cas pareil, de ne serrer les freins à fond que progressivement. Ils s'allumeraient probablement, mais c'est un petit inconvénient.

L'ingénieur Riggenbach, l'inventeur et le constructeur des freins à crémaillère, a prouvé d'une manière frappante sa confiance en leur sécurité. Accompagné d'un de ses employés, il a descendu, dans un vagon pesant sept tonnes, la pente vertigineuse du Territet-Glion. Le vagon n'était pas attaché au câble et descendait lentement, retenu seulement par la roue dentée d'un frein à main.

Ce système, usité depuis 1870 sur le Vitznau-Righi et dès lors sur plusieurs chemins de fer, n'a donné lieu jusqu'ici qu'à un seul accident grave, celui survenu en 1885 sur la ligne d'Arth-Righi. Le train est sorti des rails. Il est probable que

la roue dentée, serrée brusquement, avait produit un soulèvement comme cela a eu lieu dans certaines expériences.

Les divergences notables que les expériences du département fédéral constatent entre la puissance des divers freins du même système, montrent qu'il y a encore quelque progrès à accomplir dans leur construction et dans leur entretien, mais, tel qu'il est, le système de freins à crémaillères est certainement très approprié au service des chemins funiculaires, c'est le seul qui jusqu'ici convienne aux très fortes rampes.

Lorsque les sabots sont en bon état, l'arrêt est très doux et s'opère progressivement, ce qui est une condition essentielle.

§ 10. La voie.

La construction de la voie d'un chemin de fer funiculaire ne présente rien de particulier lorsque la pente est faible. Au Lausanne-Ouchy, on n'a observé aucun glissement longitudinal de la voie, même dans les parties où la pente atteint 12 %. On a perreyé les fossés afin d'éviter des érosions.

Au Giessbach, la pente est de 24 à 32 % et l'on a jugé nécessaire de retenir les traverses par des massifs en maçonnerie et des pieux en fer et de les relier par des longrines fixées sur leurs extrémités.

Au Territet-Glion, les pentes de 30 à 57 % exigeaient des précautions plus énergiques. Les traverses en fer sont supportées par des gradins en maçonnerie de libage soigneusement appareillés (fig. 17 et 18). Elles sont enchâssées dans des selles en fonte fixées dans la maçonnerie.

Nous avons diminué la poussée que les tabliers métalliques sous voie exercent contre leur culée aval, en munissant les extrémités des poutres porteuses de sabots triangulaires en fonte. Ces sabots sont boulonnés fortement aux poutres et reposent sur des assises horizontales qui couronnent les culées. Dans ces conditions, les poids des trains et du tablier ne produisent que des réactions verticales. La dilatation du tablier et la réaction

de la crémaillère produisent seules des poussées obliques contre la culée aval.

La plupart des chemins de fer funiculaires qui ne reçoivent sur leurs rails que leurs propres vagons ont une voie de 1 m. de largeur ; les vagons ont $2^{m}20$ de largeur maximale, ce qui ne donne que quatre places de voyageurs par banquette transversale. Nous proposerions plutôt une largeur de voie de $1^{m}15$, ce qui permettrait de donner aux voitures $2^{m}55$ de largeur maximale. On aurait ainsi des banquettes de cinq places.

Cette disposition donnerait aussi un peu plus d'espace pour les caisses à eau placées sous le vagon.

Il est assez généralement admis que le tracé des chemins funiculaires doit être rectiligne en plan, cependant la plupart des chemins construits présentent des voies courbes aux abords de la voie d'évitement et il n'en résulte aucun autre inconvénient qu'une augmentation d'usure du câble.

Nous avons vu au § 5 *b* que l'augmentation de travail moteur et de tension du câble produite par une courbe est peu considérable.

Nous en concluons que l'on pourrait desservir par un câble des tracés sinueux à la condition expresse de raccorder les changements de pente aux abords de ces courbes selon les prescriptions énoncées dans notre § 4.

Le croisement des trains s'opérant nécessairement au milieu du trajet, on peut réduire la largeur de la plate-forme en amont et en aval de la voie d'évitement. La fig. 19 indique la disposition adoptée au plan incliné du Giessbach. La voie est unique en dessus et en dessous de la voie d'évitement, ce qui réduit au minimum les frais de construction de l'infrastructure, mais cette disposition exige que le câble traverse les rails dans une rainure ; il faut aussi quatre croisements de la crémaillère et du rail, avec deux pièces de bifurcation.

En outre, afin d'éviter des aiguillages, on a placé les boudins des roues de l'un des trains à l'extérieur de la voie. Les bifurcations de rails et leurs croisements ont des rainures spéciales.

Les voies du Lausanne-Ouchy sont disposées comme l'indique

la fig. 20. La voie d'évitement n'exige ainsi qu'une pointe de cœur, le câble ne traverse pas le rail et l'on peut faire circuler des vagons provenant des chemins de fer ordinaires.

Au Territet-Glion, la voie présente en amont et en aval du croisement la disposition représentée fig. 17.

§ 11. Tambours et poulies.

Outre les galets qui soutiennent et dirigent le câble sur la voie, les chemins de fer funiculaires présentent des poulies et des tambours de divers genres, placés au haut du plan incliné. Lorsque le câble est sans fin ces organes sont placés en un point quelconque de la ligne.

Nous avons vu qu'il n'est pas possible de déterminer l'influence de ces poulies sur la tension moléculaire du câble, mais il est évident que plus leur diamètre est grand, moins est importante leur influence sur la fatigue et l'usure des fils.

L'usage paraît s'être établi de donner aux tambours et poulies un diamètre centuple de celui du câble, tandis que dans les transmissions télèdynamiques ce diamètre est de 150 à 200 fois celui du câble.

Voici quelques renseignements :

Au Lausanne-Ouchy les poulies de renvoi ont 3 m. de diamètre, soit 94 fois le diamètre du câble et 1500 fois celui des fils.

Le tambour moteur a 6 m. de diamètre.

Au Territet-Glion la poulie principale a $3^{m}57$ de diamètre, soit 108 fois celui du câble et 1880 fois le diamètre des fils.

Au Giessbach elle a 3 m. de diamètre, soit 130 fois celui du câble et 1500 fois celui des fils.

A Saillon les moufles ont $2^{m}20$ de diamètre, soit 50 fois le diamètre du câble et 1333 fois celui des fils.

Les tramways de San-Francisco ont des poulies et tambours dont le diamètre est de 96 à 100 fois celui du câble.

Les gorges des poulies et la surface des tambours doivent être garnies de cuir, de bois ou d'un alliage plus doux que le fer et

facile à remplacer. Dans nombre de cas, il est indispensable de placer des guides fixes près de la gorge des poulies, afin que le câble n'en puisse sortir.

Lorsque le câble est actionné par un moteur fixe, la tension du brin montant est plus forte que celle du brin descendant, et la poulie ou tambour ne pourrait entraîner le câble si le rapport entre ces deux tensions était plus grand que e élevé à la puissance $f \frac{s}{r}$, f désignant le coefficient de frottement, s la longueur de l'arc embrassé par le câble et r le rayon de la poulie.

Lorsque le câble est enduit de goudron, f ne dépasse guère 0,06, ainsi que nous l'avons constaté au tambour du Lausanne-Ouchy. On sait que e base des logarithmes népériens $= 2,718$.

Une poulie embrassée sur les $^3/_4$ de sa circonférence ne pourra entraîner le câble que lorsque la tension T du brin le plus tendu sera inférieure à 1,33 t.

t désignant celle de l'autre brin.

Pour des tensions supérieures on devra, ou bien augmenter la valeur de f, comme l'a fait Fowler, en munissant de pinces la gorge de la poulie, ou bien employer un tambour sur lequel le câble fait plusieurs tours, ce qui augmente le facteur $\frac{s}{r}$

Désignons par n le nombre de tours nécessaires, le rapport $\frac{s}{r} = \frac{2 \pi r n}{r} = 2 \pi n$ et l'on a

$$\frac{T}{t} = e^{2 n f} \text{ d'où } n = 6,091 \log \frac{T}{t}$$

On a cherché à augmenter l'adhérence du câble en donnant à la gorge une section en forme de coin dans lequel il se serre fortement. D'après Reuleaux le rapport $\frac{T}{t}$ pourrait être doublé en donnant à ce coin un angle de 30°. Ce procédé, ainsi que la poulie Fowler, doivent augmenter notablement l'usure du câble.

Au plan automoteur de Saillon la marche des trains est régularisée par un frein agissant sur le câble par l'intermédiaire de deux poulies dont l'une a trois gorges et l'autre deux. Le câble passe de l'une à l'autre comme dans une moufle. Ce système équivaut à un tambour sur lequel le câble ferait 2 $^1/_2$ tours. Il suffit, nous dit-on, même lorsque $T = 5\ t$, ce qui implique une valeur de $f = 0{,}10$ notablement supérieure à celle observée par nous au Lausanne-Ouchy où elle est comprise entre 0,055 et 0,07.

Une disposition analogue à celle de Saillon se trouve au Clay-street-road de San-Francisco, les deux poulies n'ont ensemble que trois gorges qui coincent le câble, mais le rapport des tensions est bien moindre.

Il est probable que l'enduit qui recouvre le câble a une très grande influence sur la valeur de f.

Lorsqu'on employe un tambour, il est nécessaire d'assurer la parfaite régularité de l'enroulement et du déroulement du câble dont les spires occupent successivement toute la longueur du tambour.

La figure 21 représente la disposition adoptée et étudiée par l'ingénieur Ch. Callon, sur notre proposition, pour le tambour du Lausanne-Ouchy.

Deux poulies de 3 m. de diamètre A A reçoivent l'une le brin montant, l'autre le brin descendant.

Leurs paliers reposent sur des glissières B B de 7 m. de portée et sont actionnés par deux vis sans fin.

Leur déplacement est de 40 mm. par tour de tambour ; l'une des poulies est en avance de 160 mm. sur l'autre lorsque le câble fait 4 $^3/_4$ tours sur le tambour C. Bien que les vis aient à supporter la tension du câble, ce système, motivé par les circonstances locales, marche d'une manière satisfaisante.

On a profité du mouvement de translation des poulies pour actionner un indicateur de la marche des trains.

Le tambour est mis en mouvement par un moteur hydraulique de 180 chevaux étudié et fourni par l'éminent ingénieur Ch. Callon. Notre collègue, M. J. Michaud, a apporté des mo-

difications heureuses à la distribution d'eau qui commande les vannes et les freins et a réussi à annuler les coups de béliers. (Voir au *Bulletin de la Société vaudoise des ingénieurs* de 1878.)

Engins accessoires. — Le service des gares des chemins funiculaires exige comme les autres chemins de fer des voies auxiliaires pour composer et décomposer les trains. Il en résulte que le câble peut avoir à passer sur des voies transversales pour chariots à niveau et sur des changements de voie. Il suffit de le dissimuler dans des rainures pratiquées dans les rails traversés et il n'en résulte aucun danger ni aucune usure, car ces manœuvres se font pendant l'arrêt des trains.

L'emploi des plaques tournantes est plus compliqué, mais on peut les construire de manière que le câble tombe pendant la manœuvre sous le plateau de la plaque, ce qui permet à celle-ci un mouvement de rotation d'une fraction de tour. Sur l'initiative de M. l'ingénieur S. Rochat, MM. Bell, à Krienz, ont construit pour le chemin de fer Lausanne-Gare une plaque pareille de 5 m.de diamètre qui fonctionne depuis 1879.

Les voies desservies font entre elles un angle de 46°.

§ 12. Exploitation.

Le système funiculaire est employé dans des conditions différant beaucoup de celles des chemins de fer ordinaires et des tramways et c'est à peine si l'on trouve deux chemins de fer à câble qui se ressemblent ; il serait donc inutile de chercher à formuler, soit des règles d'exploitation soit des évaluations de dépenses kilométriques ou par journées de voiture comme on le fait pour d'autres chemins de fer.

Nous nous bornerons donc à donner ici quelques renseignements.

Marche des trains. — La vitesse de marche des trains a peu d'importance sur les courts trajets que desservent la plupart des funiculaires.

On se borne à accomplir la course en moins de temps qu'un

piéton ou une voiture ne pourraient le faire sur les routes qui relient les points extrêmes du tracé.

Il n'y a intérêt à précipiter la marche que lorsque les trains doivent se succéder sans interruption pour suffire à un grand trafic.

On juge prudent de marcher lentement sur les fortes pentes, afin de diminuer la puissance vive du train descendant et d'augmenter ainsi l'efficacité des freins, si le câble venait à rompre, mais on ne saurait établir une relation mathématique entre la vitesse maximale et la pente.

La rupture d'un câble est, en effet, un phénomène anormal et excessivement rare dans une exploitation bien conduite et l'action utile des freins de détresse dépend non seulement de la vitesse acquise par le train descendant, mais de la manière dont on les serre, ainsi que du poids des trains et des sinuosités de la voie. Voici quelques données :

— Le Lyon Croix-Rousse, marche à raison de 2 m. par seconde sur sa pente de 0,16.

Au Lausanne-Ouchy la vitesse est de 4 m. sur la pente de 0,056 et de 3 m. sur celle 0,12.

Au Giessbach la vitesse est de 1 m., la pente de 0,32.

Au Territet-Glion elle est de $1^{m}20$ à $1^{m}60$; la pente est de 0,30 à 0;57.

Les tramways de Saint-Francisco marchent avec une vitesse de $2^{m}70$, leur pente est de 0,16 à 0,19.

Au Saillon où la pente est de 0,80, la vitesse est de 0,50.

Personnel. — Le nombre et la qualité des employés attachés aux gares et stations dépend du genre de trafic du chemin de fer, du système du contrôle des taxes perçues et du mode de signaux adoptés pour commander la marche des trains.

A cet égard, on pourra faire des économies importantes en n'ayant qu'une classe de voyageurs et qu'une taxe de parcours, ce qui permettra l'emploi de tourniquets compteurs. Une simple sonnerie électrique fournit un nombre suffisant de signaux pour tous les besoins du service et peut être manœuvrée par un garde-frein.

Nous avons appliqué ce système au chemin de fer Lausanne-Gare où il fonctionne depuis sept ans.

Il pourrait être adopté sur des lignes plus importantes. Ce n'est, en effet, pas rationnel de dépenser annuellement de grosses sommes en achats de billets et en salaire de contrôleurs et distributeurs, pour éviter la perte possible de très petites sommes par l'infidélité éventuelle d'un employé.

Les tourniquets compteurs fonctionnant en public, celui-ci contrôle inconsciemment la régularité des opérations.

Personnel des trains. — Chaque frein devant pouvoir être serré promptement, les garde-freins ne peuvent être chargés d'autres fonctions pendant la marche des trains.

Au Territet-Glion chaque voiture a deux freins à main et est montée par deux garde-freins destinés à se suppléer si, au moment critique, l'un d'eux venait à manquer de présence d'esprit, et si le frein automateur ne suffisait pas.

Au Lausanne-Ouchy les trains sont composés de plusieurs voitures tournées de manière que les manivelles des freins de deux voitures soient justaposées. Un garde-frein suffit ainsi pour deux voitures.

Dépenses d'exploitation. — Les dépenses spéciales au système funiculaire sont celles d'entretien et d'amortissement du câble, des galets et poulies et parfois d'un moteur fixe.

Les autres dépenses sont similaires à celles des chemins de fer ordinaires ou des tramways, hormis celles provenant des locomotives ou des chevaux.

Le Lausanne-Ouchy a dépensé en moyenne 54200 fr. par an pour son exploitation, non compris le service du capital de construction.

Sa recette moyenne a été de 84000 fr. pour le transport des voyageurs et bagages et de 10 300 fr. pour le transport des marchandises. Le nombre des voyageurs est annuellement de 400 000 environ.

Le Lausanne-Gare a dépensé en moyenne 15 000 fr. par an. Sa recette a été de 11 000 fr. pour les voyageurs et bagages et de 28 400 fr. pour les marchandises.

Il transporte annuellement 120 000 voyageurs.

Le Territet-Glion a dépensé pendant sa seconde année d'exploitation 29 200 fr. non compris le service du capital. Ses recettes ont été de 64 000 fr. pour transport de 80 000 voyageurs, 14 tonnes de marchandises et 103 tonnes de bagages.

Taxes de transport. — Ici encore il ne peut être question de proportionner la taxe à la longueur de la ligne. Le service rendu aux voyageurs et aux marchandises consiste le plus souvent à leur faire franchir rapidement une grande hauteur.

Le Territet-Glion qui élève ses vagons à 320 m. de hauteur est bien fondé à demander une taxe plus haute que le Lausanne-Ouchy qui ne les élève que de 100 m. ; il est cependant bien plus court. Il est aussi bien moins exposé à avoir des concurrents sur les longs lacets de la route ordinaire.

Le premier de ces chemins de fer demande aux voyageurs 1 franc pour la simple course, le second 0,25.

Au Giessbach on demande 1 fr. pour franchir 96 m. de hauteur, ce qui se justifie par le petit nombre de mois pendant lesquels il transporte des touristes.

Le Lausanne-Gare ne demande que 0,10 pour un trajet aussi long, mais il ne franchit qu'une hauteur de 32 m. et fonctionne toute l'année.

Conclusion.

Dans les lignes qui précèdent nous avons mentionné très souvent les funiculaires de Lausanne; ce sont ceux, en effet, que nous connaissons le mieux, ayant coopéré, comme chef du bureau technique, à leur construction et aux premiers temps de leur exploitation. Nous ne terminerons pas cet exposé sans rappeler que ces travaux ont été exécutés sous la haute direction de l'ingénieur J.-J. Lochmann et de notre ingénieur en chef E. Cuénod.

Nous espérons que ceux de nos collègues qui se sont occupés de chemins funiculaires voudront bien faire connaître les ré-